

**В.Д. РУДЬ**, докт. техн. наук, проф., ЛНТУ, Луцьк,

**Т. Н. ГАЛЬЧУК**, канд. техн. наук; ст. викладач, ЛНТУ, Луцьк

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ПОРОШКІВ СТАЛІ ШХ15, ОТРИМАНИХ ІЗ ВІДХОДІВ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА В КУЛЬОВИХ МЛИНАХ**

Процес подрібнення складається з субпроцесів (актів), які включають функцію подрібнення і функцію відбору, що повторюються. Тому за основу алгоритму математичної моделі взято диференціальне рівняння, що описує кінетику процесу подрібнення. А також рівняння матеріального балансу, що описує процес класифікації. Запропонована модель зручна для імітації різних режимів подрібнення в ході розв'язання задач оптимального управління.

Процесс измельчения состоит из subprocessов (актов), которые включают функцию измельчения и функцию отбора, что повторяются. Поэтому за основу алгоритма математической модели взяты дифференциальное уравнение, описывающее кинетику процесса измельчения. А также уравнение материального баланса, описывающие процесс классификации. Предложенная модель удобна для имитации различных режимов измельчения в ходе решения задач оптимального управления.

The process of grinding consists of subprocesses (acts), which include grinding and selection functions, which are repeated. Therefore, a differential equation that describes the kinetics of the process of grinding was taken as base of an algorithm of mathematical model. As well as material balance equation that describes the process of classification. An introduced model is suitable for simulation of different regimes of grinding during solution problems of optimal control.

Процес подрібнення полягає в руйнації твердих тіл послідовною серією механічних впливів. При цьому на процес впливають різноманітні фактори пов'язані із властивістю матеріалу, що руйнується; видом енергії, яка прикладається; параметрами подрібнювача, що застосовується. Кінцевий результат подрібнення залежить, головним чином, від прикладеної енергії. В даний час відомі декілька експериментально встановлених законів кожен з яких справджується тільки в області порівняно грубої дисперсності [1, 2]. Для математичного опису гранулометричного складу, продуктів подрібнення багатьма авторами запропоновано математичні залежності, які не можуть бути універсальними, оскільки ґрунтуються на деяких допущеннях і визначених умовах, а дослідні криві характеристик крупності мають значно різноманітні форми. Продукти механічного подрібнення твердих матеріалів складаються із суміші частинок, розмір і форма яких коливаються в широких ме-

жах. Для повної характеристики їх дисперсності необхідно знати гранулометричний склад, тобто відносний вміст зерен кожного розміру.

Мета роботи полягає в побудові найбільш наближеної до реального процесу подрібнення, математичної моделі. Дана модель дозволить: визначити оптимальні режими роботи кульового млина, передбачити характеристики продуктів подрібнення за відомими характеристиками початкового матеріалу і режимах роботи млина.

Об'єктом математичного моделювання є кульовий млин в сукупності з процесом класифікації. При моделюванні прийняті наступні допущення: розподіл частинок в млині і на контрольних ситах прийнятий рівномірним по всій поверхні, ефективність класифікації є величиною постійної і не змінюється в часі.

Для вибору необхідного в подальших дослідженнях простого і зручного рівняння кінетики розглядалися рівняння з одним параметром, зокрема теоретична формула А. Загустіна – В. Товарова, а також рівняння з двома параметрами: модифікованої формули В. Товарова; рівняння Ж. Гундерманна; рівняння кінетики подрібнення К. Разумова.

В результаті дослідження експериментальним шляхом встановлено, що зміна подрібнення залишку залежить від його кількості в млині [3]. У процесі подрібнення змінюється міцність залишку, точніше його опір подрібненню, зменшується середній розмір зерен крупного класу, змінюється вірогідність попадання зерен крупного класу в зону удару між кулями. Спільний вплив цих факторів на подрібнення може збільшувати або зменшувати подрібнення крупного класу з часом. Також в процесі подрібнення число слабких місць в зернах подрібнюваного матеріалу, по яких в основному розколюються зерна, зменшується і опір злому частинок, що залишилися, збільшується, тобто матеріал ніби зміцнюється під час подрібнення.

При такому тлумаченні подрібнення в млині можна прогнозувати, як підвищується подрібненість крупного класу з плином часу для окремих матеріалів.

Для експериментальної перевірки рівнянь кінетики використали порошок порошок сталі ШХ15, отриманий із шліфошламів. Подрібнення відноситься до числа основних технологічних процесів утилізації шліфувальних шламів [4]. На його реалізацію припадає значна частина експлуатаційних витрат. Операція подрібнення – процес механічного руйнування часток порошків сталі ШХ15, призначений для максимально можливого подрібнення по-

чаткових часток та надання їм регулярної форми. Регулювання циклу подрібнення зводиться до забезпечення максимальної продуктивності млина при заданій гранулометричній характеристиці подрібненого класу. Від якісно-кількісних показників подрібнення залежать результати всієї подальшої переробки продукту, перш за все, такі як формуємість, однорідність властивостей по об'єму, продуктивність процесу отримання готових виробів.

Подрібнення проводилося в кульовому млині із зміщеною віссю обертання внутрішнім  $\varnothing$  170 мм. В якості розмольних тіл використовувались сталеві кулі  $\varnothing$  23 мм. Дослідження проводилося протягом 4 і 8 год при співвідношенні маси порошку до маси розмольних тіл 1 : 0,75. Після подрібнення порошок постачався на ситовий аналіз. Форма часток порошку досліджувалася методом електронної мікроскопії. Переважна кількість часток порошку містяться в діапазоні фракцій – 0,2 + 0,05. Це свідчить про те, що при розмелюванні необхідно забезпечити такий режим, який, з одного боку, виправляє форму часток і, з другого – їх подрібнює. Такий режим досягається підбором відповідної частоти обертання млина (0,75...0,8)  $n_{кр} = 77,1 \text{ хв}^{-1}$ , при якій реалізується ударна і стираюча дія розмельних тіл [5].

Подрібнення часток порошку здійснюється двома механізмами. Перший пов'язаний з крихким руйнуванням. Йому сприяє наявність залишків абразивних матеріалів у вигляді включень на поверхні часток, які виступають як концентратори напруг. Реалізація цього механізму забезпечується ударною дією куль. Другий механізм пов'язано з пластичними деформаціями часток порошку і він обумовлюється стираючою дією сталевих куль.

Результати досліджень подрібнення порошку сталі ШХ15 показали, доцільність використання рівняння кінетики з двома параметрами, зокрема проф. К. Разумова, оскільки дане рівняння найбільш підходить для побудови математичної моделі гранулометричного складу даного порошку. В середньому, відхилення розрахункових даних від дослідних складає до 1 % (рис. 1).

Для розрахунків використовували рівняння кінетики:

$$R = R_0 \times p / (e^{kpt} + p - 1),$$

що отримане із початкового:

$$\frac{dR}{dt} = -k \times R \times m,$$

де  $R$  – кількість великого неподрібненого класу в матеріалі, що рівна залишку на ситі до моменту часу  $t$ , % або долі од.;  $t$  – час подрібнення;  $k$  – постійний параметр, що залежить від умов подрібнення та властивостей матеріалу, який подрібнюється;  $m$  – відносна подрібнюваність залишку, тобто відношення подрібнюваності залишку в любий момент часу до подрібнюваності в початковий момент.

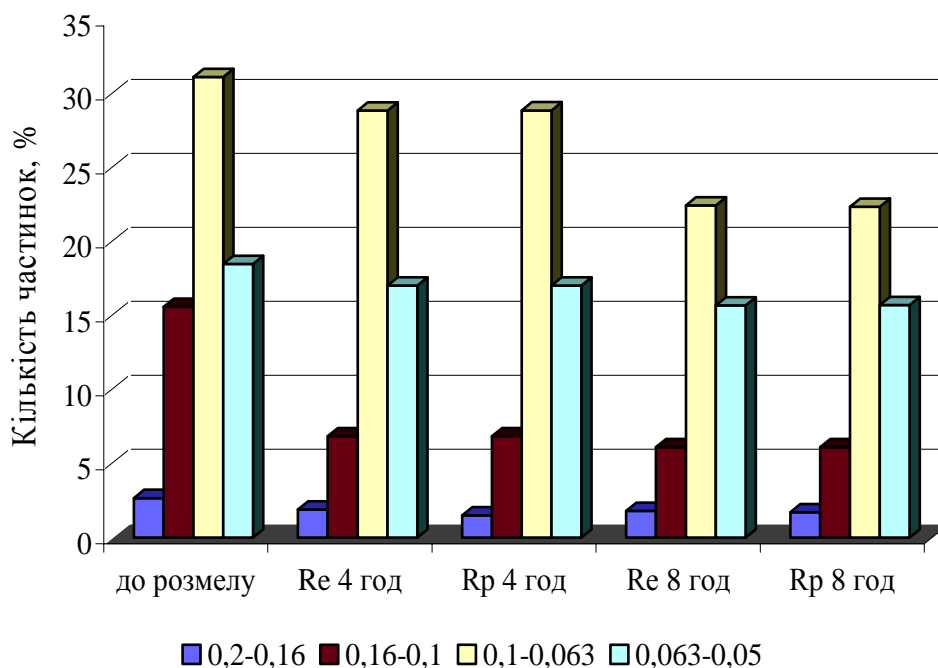


Рис. 1. Розрахункові за рівнянням та дослідні дані обкатування – подрібнення порошку ШХ15 кульками  $\varnothing 23$  мм

Це рівняння задовольняє обидві граничні умови процесу: при  $t \rightarrow 0$  відносна швидкість подрібнення дорівнює  $k$  при  $t \rightarrow \infty$ , тобто при  $R = 0$ , швидкість подрібнення має цілком визначену величину  $k \times p$ .

Для визначення параметрів  $p$  та  $k$  використовувались рівняння:

$$p = \left[ 1 + R_0 \times \left( \frac{1}{R_2} - \frac{2}{R_1} \right) \right] / \left( \frac{R_0}{R_1} - 1 \right)^2, \quad k = \ln \left( \frac{R_0 \times p}{R} + 1 - p \right) / (p \times t).$$

Параметри знаходили аналітичним шляхом за двома експериментальними точками для кожної кінетичної кривої, тобто за двома значеннями  $R_1$  та  $R_2$  при різному часі  $t_1$  і  $t_2$ , для підвищення точності розрахунків знайдені значення усереднюються.

Параметр  $p$  характеризує властивості подрібнювального матеріалу (міцність і подрібнюваність), його значення для даного матеріалу і класу є сталим.

Параметр  $k$  характеризує швидкість подрібнення в початковий момент, визначає нахил кінетичної кривої до осі абсцис на початку процесу і, як наслідок цього, вигляд кривої впродовж інших періодів подрібнення.

Параметр  $k$  прямим чином залежить від розмірів млина, способу подрібнення, набору і величини куль і т.п.

Підставляючи значення параметра  $k$  для кожного з випадків, отримуємо значення кількості крупного класу для визначеного часу.

Згідно з вищесказаним, виведено рівняння кінетики для кожного з досліджуваних класів і побудовано графіки, що зображують кінетику подрібнення кожного з класів (рис. 2).

Наприклад, для класу 016:  $R = 0.043794 \times R_0 / (e^{0.043794 \cdot k \cdot t} - 0.956206)$ .

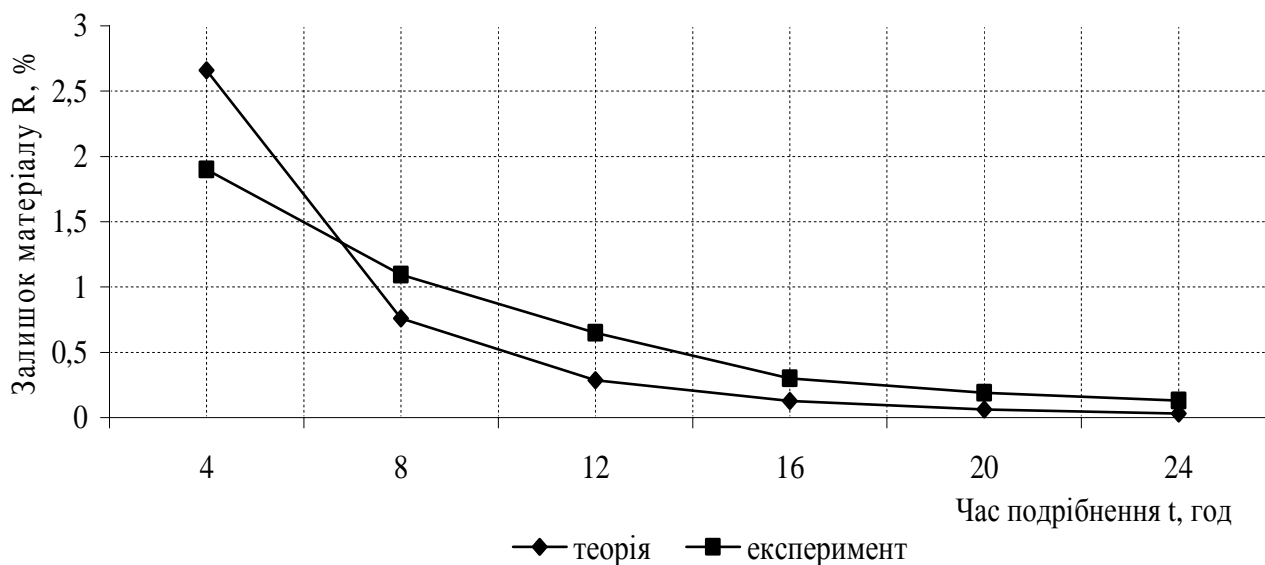


Рис. 2. Кінетика подрібнення матеріалу за класом 016

Загальна закономірність подрібнення зберігається і для порошків без попередньої класифікації (рис. 3).

Проведений аналіз методик визначення подрібнення матеріалів вказує на те, що значний вплив на точність розрахунків має початкова форма подрібнювального матеріалу.

Найбільш точно процес подрібнення металічного порошку сталі ШХ15 математично описує рівняння кінетики проф. К. Разумова. Це рівняння можна використовувати для прогнозування кінетики подрібнення порошкових

матеріалів, частинки яких деформовані в різних напрямках і мають сильно розгалужену поверхню. Саме до таких порошкових матеріалів належать порошки сталі ШХ15, отримані із шліфошламів.

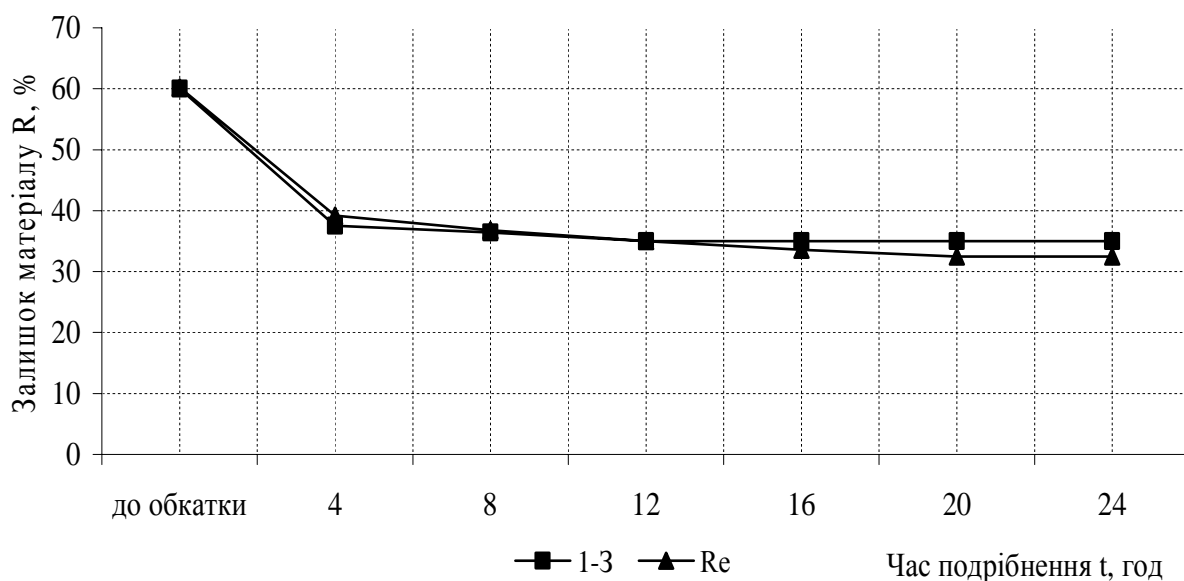


Рис. 3. Залежність залишку порошку R від терміну обкатування – подрібнення (без класифікації):

1 – 3 – розрахункові дані для порошку після шліфування загартованих деталей;  
Re – експериментальні дані.

**Список літератури:** 1. Беленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах / Л.Ф. Беленко. – М.: Недра, 1984. – 200 с. 2. Петров В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учебное пособие для вузов / В.А. Петров, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – М.: Недра, 1990. – 301 с. 3. Рудь В.Д. Дослідження процесів подрібнення металевих порошків / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук // Наукові нотатки. – 2009. – Вип. 25. – С. 306 – 310. 4. Рудь В.Д. Использование отходов подшипникового производства в порошковой металлургии / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной // Порошковая металлургия. – 2005. – № 1/2. – С. 106 – 112. 5. Дзnelадзе Ж.И. Порошковая металлургия сталей и сплавов / [Ж.И. Дзnelадзе, Р.П. Щеголева, Л.С. Голубева и др.]. – М.: Металлургия, 1978. – 264 с.

Надійшла до редколегії 12.06.11